

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Měření průtoků vody v potrubích velkých průměrů
Water Flow Measurement in Pipeline of Large Diameter

Student:
Vedoucí bakalářské práce:

Ostrava 2017

Pavel Michalka
Ing. Radim Janalík, Csc.

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Pavel Michalka**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3907R009 Provoz energetických zařízení
Téma: **Měření průtoků vody v potrubích velkých průměrů**
Water Flow Measurement in Pipeline of Large Diameter

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- Popis využití potrubí velkých průměrů v energetice
- Možnosti měření průtoků vody v potrubích o průměru cca 1000 mm
- Porovnání vlastností uvedených způsobů měření průtoků
- Návrh měření průtoků vody v potrubí o průměru 1000 mm

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Rajniak a kolektiv: Tepelno-energetické a emisné meranie. Ister Science, 1997.
- [2] Ambros, F.: Experimentální metody a technika. Praha, ČVUT, 1993
- [3] ČSN ISO 5167-1. Měření průtoků tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku. 1993.
- [4] Literatura výrobců průtokových měřidel

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Radim Janalík, CSc.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Ing. Kamil Kolarčík, CSc.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 12.5. 2017

Michal Ša

Prohlašuji, že

- Jsem byl seznámen s tím, že na mojí bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečné ke své vnitřní potřebě diplomovou/bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB – TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne: 12.5.2017

Michalka

Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Pavel Michalka

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

MICHALKA, P. Měření průtoků vody v potrubích velkých průměrů: bakalářská práce. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2017, 57 s., Vedoucí práce: Ing. Radim Janalík, Csc.

Bakalářská práce se zabývá možnostmi měření průtoků vody v potrubích velkých průměrů. Náplní první části práce je popis využití velkých průměrů potrubí v energetice, dále pak zorientovat se v metodách měření průtoků, které jsou aplikovatelné pro potrubí o velkých průměrech, popsat jejich principy, uvést výhody a nevýhody a porovnat parametry jednotlivých metod z různých hledisek. Náplní druhé části práce je provést vlastní návrh měření průtoku vody v potrubí o průměru 1000 mm.

Klíčová slova: měření průtoku, potrubí, průtokoměr, mechanika tekutin

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

MICHALKA, P. Water Flow Measurement in Pipeline of Large Diameter: Bachelor Thesis. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy, 2017, 57 p., Thesis head: Ing. Radim Janalík, Csc.

The bachelor thesis is dealing with possibilities of water flow measurement in pipelines of large diameter. The objective of the first part of the thesis is to describe the usability of large diameter pipes in energy engineering, then to understand the methods of flow measurement that are usable for pipes of large diameter, describe their principles, state advantages and disadvantages and to compare the parameters of each flow measurement method from different points of view. The objective of the second part of the thesis is to realize a proposal of water flow measurement in pipeline of 1000 mm diameter.

Key words: flow measurement, pipes, flowmeter, fluid mechanics

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Radimovi Janalíkovi, Csc., který mi poskytl mnoho cenných rad a pomohl při tvorbě této bakalářské práce.

Obsah

Seznam použitého označení.....	9
Úvod	10
1 Základní pojmy.....	11
1.1 Objemový průtok.....	11
1.2 Hmotnostní průtok.....	11
1.3 Bernoulliho rovnice.....	12
1.4 Torriceliho vzorec	12
1.5 Rovnice kontinuity	13
1.6 Pascalův zákon	13
1.7 Reynoldsovo číslo	14
1.8 Druhy proudění	14
1.8.1 Laminární proudění	15
1.8.2 Turbulentní proudění.....	15
1.9 Změna průměru potrubí.....	15
1.10 Kavitace.....	16
2 Využití potrubí velkých průměrů v energetice.....	17
2.1 Jaderné elektrárny	17
2.2 Přecherčpávací vodní elektrárny.....	18
2.3 Uhelé elektrárny	18
2.4 Geotermální elektrárny.....	18
2.5 Další možnosti využití.....	19
3 Možnosti měření průtoků vody v potrubích o průměru cca 1000 mm.....	20
3.1 Průtokoměry na principu tlakového rozdílu.....	20
3.1.1 Normalizovaná clona	22
3.1.2 Venturiho trubice	24
3.2 Indukční průtokoměry	26
3.3 Ultrazvukové průtokoměry	28
3.3.1 Přímé ultrazvukové průtokoměry.....	30
3.3.2 Ultrazvukové průtokoměry s využitím Dopplerova principu	32
3.4 Zásuvné turbínové průtokoměry	32
4 Porovnání vlastností uvedených způsobů měření průtoků	34
4.1 Porovnání rozsahů průměrů potrubí pro uvedené metody	35

5	Návrh měření průtoku vody v potrubí o průměru 1000 mm	36
5.1	Výběr lokality	36
5.2	Vstupní hodnoty a data primárního prvku	37
5.3	Výběr průtokoměru	37
5.4	Návrh Venturiho trubice	38
5.4.1	Typ Venturiho trubice	38
5.4.2	Rozměry Venturiho trubice	39
5.4.3	Odběry tlaků	40
5.4.4	Požadavky na zabudování Venturiho trubice	40
5.5	Návrh provedení měření průtoku	41
5.6	Vliv změny parametrů měřené kapaliny na přesnost měření	41
5.7	Návrh impulzního potrubí	42
5.8	Návrh měřících přístrojů a jejich příslušenství	42
5.8.1	Snímač teploty	42
5.8.2	Snímač tlakové difference	44
5.8.3	Pěticestná ventilová souprava	47
5.8.4	Vyhodnocovací zařízení	49
5.9	Vlastní schéma návrhu měření průtoku	50
5.10	Konstrukční výkres Venturiho trubice	50
6	Závěr	51
7	Seznam použité literatury	52
8	Seznam obrázků	55
9	Seznam tabulek	57
10	Seznam příloh	57

Seznam použitého označení

Značka	Popis	Jednotka
B	Magnetická indukce	[T]
C	Součinitel průtoku	[-]
D, DN	Velký vnitřní průměr	[mm]
d	Malý vnitřní průměr	[mm]
f_1, f_2	Frekvence	[Hz]
g	Tíhové zrychlení	[m·s ⁻²]
h	Spád	[m]
HP	High Pressure (vysoký tlak)	[Pa]
k	Korekční činitel závislý na Re	[-]
k ₁	Korekční součinitel pro objemové měření průtoku	[-]
L, l	Vzdálenost, délka	[m]
LP	Low Pressure (nízký tlak)	[Pa]
m	Hmotnost	[kg]
p, p ₁ , p ₂	Tlak	[Pa]
p _s	Statický tlak	[Pa]
Q _m	Hmotnostní průtok	[kg ³ ·s ⁻¹]
Q _v	Objemový průtok	[m ³ ·s ⁻¹]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
S, S ₁ , S ₂	Plocha	[mm ²]
t	Čas	[s]
t ₁	Teplota	[°C]
U	Napětí	[V]
V	Objem	[m ³]
v, v ₁ , v ₂	Rychlost proudění	[m·s ⁻¹]
β	Poměr průměrů d/D	[-]
Δt	Rozdíl teplot	[°C]
ε	Součinitel expanze	[-]
η	Kinematická viskozita	[m ² ·s ⁻¹]
ϑ	Teplotní součinitel objemové roztažnosti	[K ⁻¹]
ν	Dynamická viskozita	[Pa·s ⁻¹]
ρ, ρ ₁	Hustota tekutiny	[kg·m ⁻³]
φ	Vrcholový úhel difuzoru	[°]
ω _s	Střední rychlost proudění	[m·s ⁻¹]

Úvod

Měření průtoků vody je důležité z hlediska jak bezpečnostního, tak i ekonomického a také z hlediska ověření distribuce do koncových zařízení. U potrubí velkých průměrů to platí obzvlášť, protože při velkých průtocích vody představuje každá chyba nebo nepřesnost v měření značný problém. Proto průmysl a energetika vyžaduje nejen co nejpřesnější metody měření, ale také spolehlivost, odolnost a trvanlivost zařízení pro měření průtoků.

Cílem mé bakalářské práce je zorientovat se v problematice měření průtoků vody v potrubích velkých průměrů, popsat a porovnat jednotlivé metody měření, uvést jejich výhody a nevýhody, dále pak provést vlastní návrh měření průtoku vody.

V teoretické části se věnuji základním pojmům a vztahům, které s měřením průtoků souvisí, dále pak možnostem využití velkých průměrů potrubí v energetice, popisu a vysvětlení jednotlivých metod měření a jejich vzájemnému srovnání z pohledu rozličných hledisek.

V praktické části se zabývám vlastním návrhem měření průtoku vody v potrubí o průměru 1000 mm. Návrh zahrnuje výběr lokality pro měření, volbu průtokoměru a jeho následné dimenzování v souladu s normou, výběr snímačů veličin a jejich příslušenství včetně popisu funkcí jednotlivých zařízení, schéma měření a konstrukční výkres samotného průtokoměru.

1 Základní pojmy

Tato kapitola se věnuje základním pojmům a definicím, které jsou nezbytné pro následné pochopení problematiky měření průtoků. V kapitole jsou uvedeny druhy průtoků, základní definice z oblasti mechaniky tekutin, související rovnice a vztahy, typy proudění a jevy, které se při měření průtoků vyskytují.

1.1 Objemový průtok

Objemové měření průtoků lze definovat jako množství tekutiny proteklé za jednotku času. Vztah pro objemový průtok lze psát ve tvaru: [2]

$$Q_v = \frac{V}{t} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1)$$

kde:

$$\begin{array}{ll} V & \text{objem tekutiny} \quad [\text{m}^3] \\ t & \text{čas} \quad [\text{s}] \end{array}$$

Objemové měření průtoků se používá hlavně při přesných měřeních (ověřování průtokoměrů) a v provozu pro bilanční měření. [2]

1.2 Hmotnostní průtok

Hmotnostní průtok lze definovat jako hmotnost tekutiny proteklé za jednotku času. [2]

$$Q_m = \frac{m}{t} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2)$$

kde:

$$\begin{array}{ll} m & \text{hmotnost tekutiny} \quad [\text{kg}] \\ t & \text{čas} \quad [\text{s}] \end{array}$$

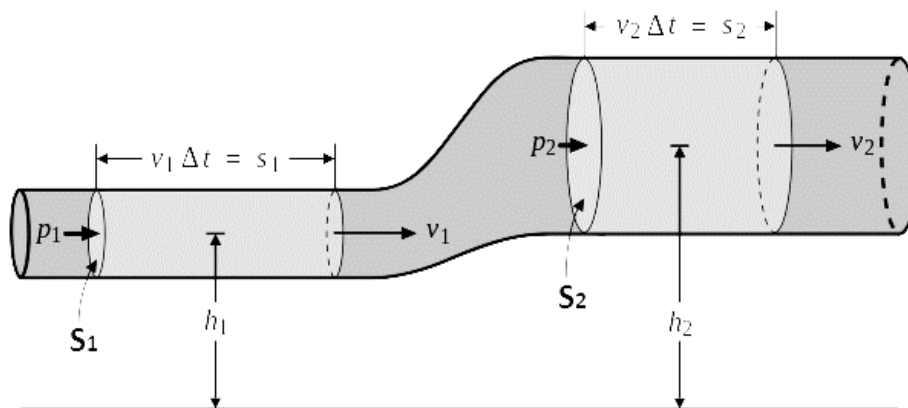
1.3 Bernoulliho rovnice

Jedná se o rovnici, která vyjadřuje zákon zachování energie pro ustálené proudění v ideální kapalině. Součet tlakové $\frac{p}{\rho}$, polohové $g \cdot h$, a kinetické $\frac{v^2}{2}$ energii je roven celkové mechanické energii: [8]

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + g \cdot h_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + g \cdot h_2 \quad (3)$$

kde:

v	rychlost proudění	[kg]
p	tlak v kapalině	[Pa]
ρ	hustota kapaliny	[kg·m ⁻³]
g	tíhové zrychlení	[m·s ⁻²]
h	spád	[m]

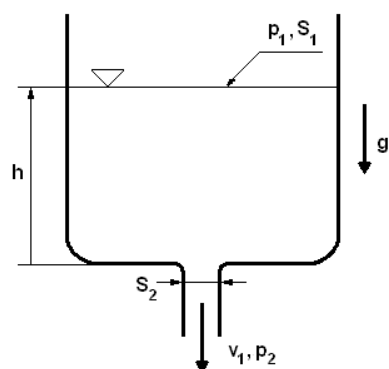


Obr. 1 Schéma pro odvození principu Bernoulliho rovnice [26]

Princip Bernoulliho rovnice se využívá při měření průtoků tekutin u průřezových průtokoměrů.

1.4 Torriceliho vzorec

Torriceliho vzorec vychází z Bernoulliho rovnice a slouží k výpočtu rychlosti výtoku ideální kapaliny. Rychlost, kterou proudí kapalina otvorem pod výškou kapalinového sloupce h je rovna rychlosti volného pádu tělesa (v tomto případě kapky vody) v okamžiku dopadu ze stejné výšky. [8]



Obr. 2 Výtok z nádoby - odvození Torricelliho vztorce [27]

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + g \cdot h_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + g \cdot h_2$$

$$\frac{v_1^2}{2} + g \cdot h_1 = 0$$

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4)$$

1.5 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity je v podstatě formulace obecného fyzikálního zákona o zachování hmotnosti. Rovnice vyjadřuje vzájemnou závislost mezi rychlostí při ustáleném proudění ideální kapaliny v trubici a plochou daného průřezu. [8]

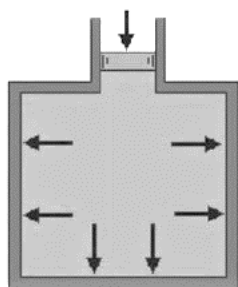
$$Q_v = S \cdot v \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5)$$

kde:

$$\begin{array}{ll} S \text{ plocha průřezu trubice} & [\text{m}^2] \\ v \text{ rychlost proudění} & [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \end{array}$$

1.6 Pascalův zákon

Pascalův zákon říká, že tlak vyvolaný vnější silou na tekutinu v uzavřené nádobě je ve všech místech tekutiny stejný. Principu Pascalova zákona se používá při metodách měření průtoků založených na rozdílu statických tlaků. [1]



Obr. 3 Princip Pascalova zákona [25]

1.7 Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo je bezrozměrná veličina, pomocí které je možné určit druh proudění.

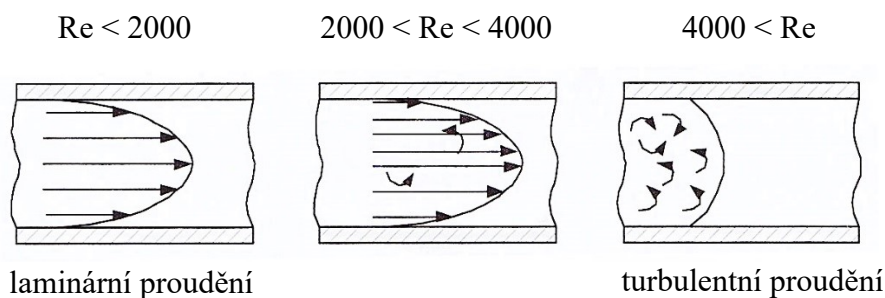
$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad [-] \quad (6)$$

kde:

v	rychlost proudění	$[m \cdot s^{-1}]$
D	(vnitřní) průměr potrubí	$[m]$
ν	kinematická viskozita	$[m^2 \cdot s^{-1}]$

1.8 Druhy proudění

Funkce průtokoměru je zásadně ovlivněná druhem proudění tekutiny. Povaha proudění je závislá na rozložení třecích a setrvačných sil v kapalině. Rozlišujeme proudění laminární a turbulentní. Reynoldsovým číslem se určí o jaký druh proudění se jedná. Oba druhy proudění mají rozdílný rychlostní profil a hydraulické ztráty. Mezi laminárním a turbulentním prouděním existuje přechodová oblast s asymetrickým nerovnoměrným rychlostním profilem, ve které nelze o druhu proudění jednoznačně rozhodnout. [4]



Obr. 4 Rychlostní profily pro různé druhy proudění tekutiny [4]

1.8.1 Laminární proudění

Při laminárním proudění se částice tekutiny pohybují ve vrstvách, aniž by se přemísťovaly do průřezu. Laminární proudění je charakteristické pro viskózní tekutiny a pro nízké rychlosti proudění. [8]

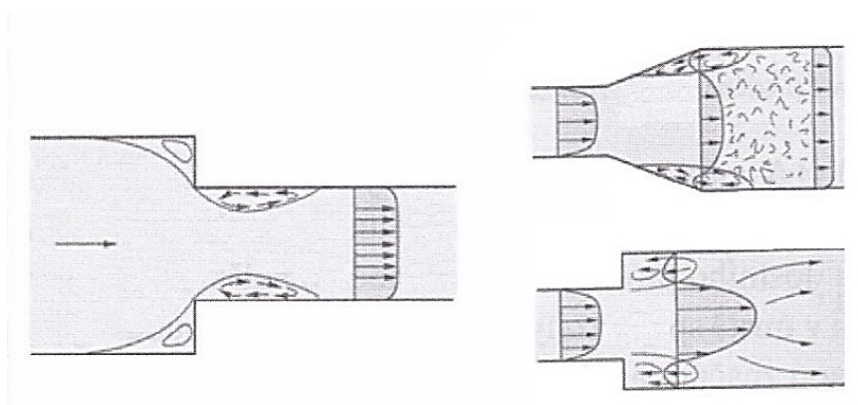
1.8.2 Turbulentní proudění

Při turbulentním proudění se jednotlivé vrstvy tekutiny intenzivně promíchávají. Vytváří se víry a chaotický pohyb tekutiny, který nepřispívá k průtoku. Pro zvýšení průtoku je nutné zvětšit tlak. [8]

1.9 Změna průměru potrubí

V souladu s definicí Bernoulliho rovnice má náhlá redukce průměru potrubí za následek zploštění rychlostního profilu na straně nacházející se ve směru proudění, celkový vliv je přitom závislý na hodnotě Reynoldsova čísla.

Náhlá kontrakce potrubí na vstupu do užší části potrubí vyvolá zmenšení údaje průtokoměru. Tato chyba je závislá na vzdálenosti průtokoměru od místa kontrakce. Elektromagnetické průtokoměry je doporučeno instalovat ve vzdálenosti alespoň 10 DN od místa kontrakce, pro ostatní průtokoměry je doporučena vzdálenost alespoň 15 až 20 DN. [4]



Obr. 5 Vliv změny průměru potrubí na tvar rychlostního profilu [4]

1.10 Kavítace

Jedná se o náhlý vznik dutin plynné fáze v prostředí fáze kapalné. Vzniká lokálním náhlým poklesem tlaku v proudící kapalině. Za jistých okolností kavitaci doprovází lokální tvorba kavitačních dutin (bublinek plynu nebo páry).

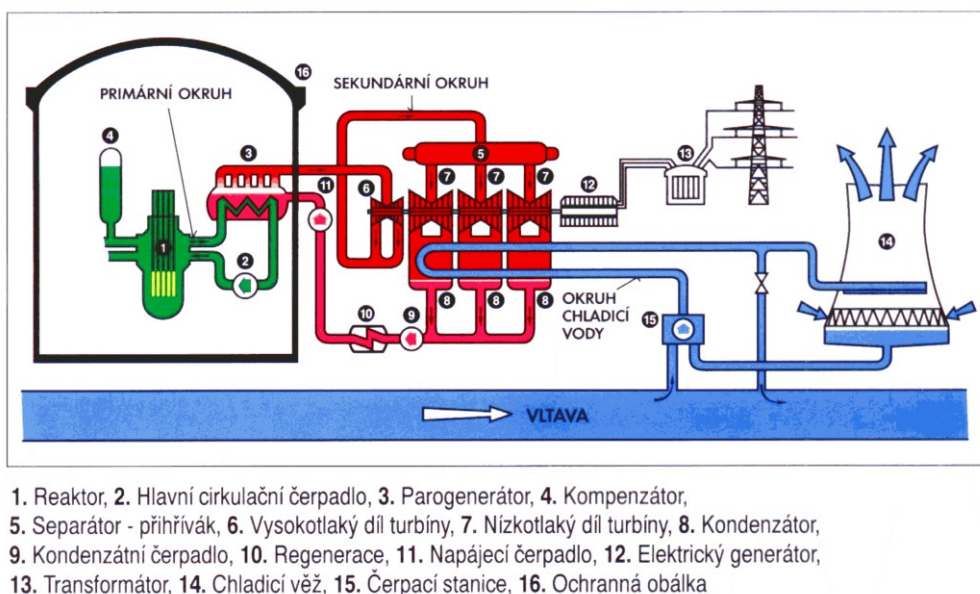
Kavitace může v průtokoměrech vzniknout při náhlém poklesu tlaku při proudění kapalin, které obsahují velké množství plynu (např. při průtoku kapaliny clonou nebo místem s náhlou změnou průřezu). Jevy, které kavitaci doprovázejí jsou vibrace, hluk, silný ohřev, vznik elektrického proudu a hlavně narušení povrchu části průtokoměru v místě, kde bubliny plynu nebo páry zanikají. Do dnešní doby nebyl objeven materiál, který by byl trvale odolný vůči kavitaci. [4]

2 Využití potrubí velkých průměrů v energetice

Potrubí o velkých průměrech lze najít v mnoha oblastech energetiky. V této kapitole je uvedeno několik nejčastějších případů z praxe.

2.1 Jaderné elektrárny

V jaderných elektrárnách se používají potrubí o velkých průměrech v systému technické vody důležité (TVD) uzavřeného okruhu, který slouží k chlazení technologických zařízení elektrárny, důležitých pro jadernou bezpečnost, dále v systému technické vody nedůležité (TVN) v otevřeném okruhu, který zajišťuje vodu pro chlazení technologických zařízení. Kupříkladu jaderná elektrárna Dukovany používá na systému TVD potrubí o průměru 820 mm a jako průtokoměr je zde použita clona, na systému TVN se používá potrubí o průměru 720 mm a průtokoměrem je zde opět použita clona. [6]



Obr. 6 Schéma jaderné elektrárny Temelín [24]

Až několikametrové průměry potrubí se využívají také v cirkulačních potrubích mezi kondenzátorem a chladicími věžemi jaderných elektráren. Výběr průtokoměrů na těchto tratích záleží individuálně na konkrétních elektrárnách, vesměs je možné použít veškeré metody, které jsou uvedeny v kapitole 3. [6]

2.2 Přečerpávací vodní elektrárny

Potrubí o velkých průměrech se používá také u různých druhů vodních elektráren, jako jsou například akumulární, průtočné a přečerpávací vodní elektrárny. Jako konkrétní příklad z praxe lze uvést přečerpávací vodní elektrárnu Dlouhé stráně, kde se jako přivaděč mezi dolní a horní nádrží používá soustava dvou ocelových potrubí o průměrech 3,6 metru. [10]



Obr. 7 Schéma přečerpávací vodní elektrárny Dlouhé stráně [23]

Dalším příkladem je vodní nádrž Dalešice, ležící na řece Jihlavě. Hlavním účelem nádrže je dodávka technologické vody pro jadernou elektrárnu Dukovany. Pod hrází se nachází přečerpávací vodní elektrárna, kdy se na turbíny se přivádí voda prostřednictvím čtyř ocelových potrubí o průměru 6200 mm. [10]

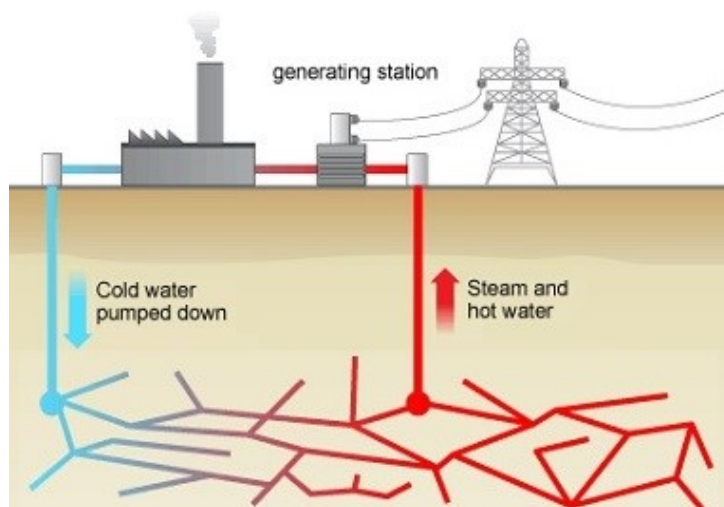
2.3 Uhlé elektrárny

Stejně jako u elektráren jaderných se i zde na cirkulačních chladicích okruzích používají potrubí řádově o průměrech okolo jednoho ale i více metrů, vše záleží individuálně na konkrétní elektrárně. Výběr průtokoměru záleží individuálně na konkrétní elektrárně. Potrubí o velkých průměrech lze nalézt také u přívodních potrubí velkých kotlů.

2.4 Geotermální elektrárny

V zemích, které disponují možností využívat geotermální energii k výrobě elektřiny a tepla (například Island nebo Japonsko) se nacházejí geotermální elektrárny, které pro

přívod vody do podzemí a pro čerpání horké vody pod tlakem využívají potrubí o velkých průměrech, to samé platí pro cirkulační okruhy mezi kondenzátorem a chladicími věžemi.



Obr. 8 Schéma geotermální elektrárny [22]

2.5 Další možnosti využití

Potrubí o velkých průměrech můžeme nalézt u vodárenských nádrží pro zásobování pitné vody. Příkladem z praxe může být vodní nádrž Želivka, kde se pro sledování vodárenských odběrů používá potrubí DN 1200 v objektu flokulace a dávkování chemikálií, pro měření průtoku je zde použit indukční průtokoměr. V objektu filtrace se nachází potrubí DN 800, taktéž se zde používá indukční průtokoměr. Spodní výpusť se skládá ze dvou potrubí DN 1400 na kterých se průtok měří ultrazvukovými průtokoměry. U mnoha vodních nádrží pro zásobování pitné vody (včetně výše uvedené) bývají rovněž nainstalovány malé vodní elektrárny, tudíž i zde je vidět přímou souvislost s použitím velkých průměrů potrubí v energetice. [10]

3 Možnosti měření průtoků vody v potrubích o průměru cca 1000 mm

V této kapitole se budu věnovat pouze těm metodám měření průtoků, které svými parametry umožňují měření v potrubích, zahrnujících průměry o velikostech 1000 mm. Nebudu zde zmiňovat metody měření, které toto kritérium nespĺňují, protože to není tématem této práce.

3.1 Průtokoměry na principu tlakového rozdílu

Princip měření průtoků jakýmkoli škrtícím prvkem, například clonou, spočívá v tom, že při zmenšení průtokového průřezu musí zákonitě nastat zvětšení kinetické energie na úkor energie tlakové, podle obrázku 1. Rozdíl statického tlaku před a za clonou (směr je dán směrem proudění) se měří přes odběry tlaku – jedná se o otvory nebo štěrby ve stěně potrubí. Přední odběr tlaku, který se nachází před clonou a má vyšší hodnotu statického tlaku se často označuje jako „plusový odběr“ a odběr, který se nachází za clonou a má nižší hodnotu statického tlaku se označuje jako „mínusový odběr“. V literatuře se clona nebo jiný škrtící prvek označuje jako „primární prvek“. Přístroje, měřící diferenci tlaků, případně jiné termofyzikální veličiny se souhrnně označují jako „sekundární prvky“. Ze zákona o zachování energie (Bernoulliho rovnice) a z rovnice kontinuity je vyjádřen základní vztah pro výpočet hmotnostního průtoku přes primární prvek. [1], [5]

Tento vztah lze zapsat ve tvaru: [1]

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \epsilon_1 \frac{\pi}{4} d^2 \cdot \sqrt{2\Delta p \rho_1} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (7)$$

kde:

$$\beta \quad \text{poměr průměrů} \quad \beta = \frac{d}{D} \quad [-]$$
$$\frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad \text{faktor vstupní rychlosti} \quad [-]$$

C - součinitel průtoku. Jedná se o bezrozměrný součinitel, definovaný pro proudění nestlačitelných tekutin. Jeho velikost je dána poměrem skutečného průtoku a teoreticky vypočteného průtoku přes daný primární prvek. Pro normalizované primární prvky se součinitel C počítá podle vztahů, které jsou uvedeny v normě.

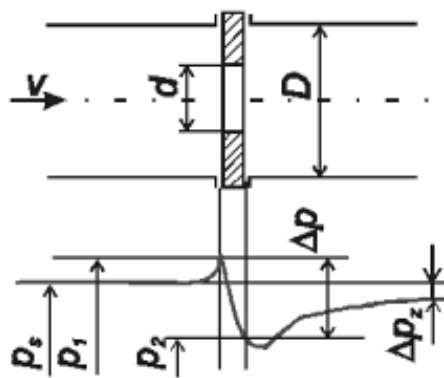
ϵ_1 [-] Součinitel expanze. Jedná se o bezrozměrný součinitel. Zohledňuje se jím stlačitelnost měřené tekutiny. Závisí na druhu proudění (které charakterizuje

Reynoldsovo číslo) a na vlastnostech proudící tekutiny. Při měření nestlačitelných tekutin (při běžných pracovních tlacích se takto může označit většina kapalin) platí $\varepsilon_1 = 1$. Index součinitele „1“ znamená, že se tento součinitel vyjadřuje vzhledem k podmínkám před primárním prvkem.

d [m] Vnitřní průměr primárního prvku (například clony, dýzy, Venturiho trubice..) při provozní teplotě. Předpokládá se, že provozní teplota primárního prvku je rovna teplotě tekutiny na jeho vstupu.

Δp [Pa] Diferenční tlak tekutiny, který je měřen přes odběry tlaku primárního prvku.

ρ_1 [kg·m⁻³] Měrná hmotnost tekutiny v podmínkách (teplota, tlak) před primárním prvkem.



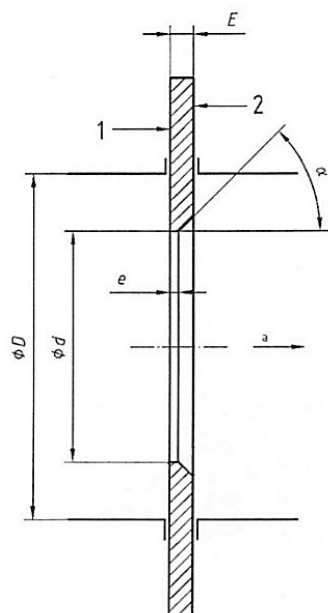
Obr. 9 Tlakový rozdíl na cloně [21]

V postupech výpočtů podle normy ISO 5167 se předpokládá, že měrná hmotnost tekutiny před primárním prvkem je známa, takže je přímo měřená. To se však v praxi vyskytuje zřídka, protože přístroje na měření hmotnosti jsou velmi drahé a obtížně se kalibrují. Proto se ve většině případů měrná hmotnost počítá, resp. odečítá z tabulek na základě měřených hodnot teploty a při stlačitelných tekutinách i na základě hodnot tlaku. [1]

Pro měření průtoku vody na potrubích o průměru cca 1000 mm je vhodná klasická Venturiho trubice a normalizovaná clona. Pro potrubí od 1000 mm do 1200 mm lze použít Venturiho trubici s plechovým svařovaným konfuzorem.

3.1.1 Normalizovaná clona

Jedná se o kruhovou desku s centrickým kruhovým otvorem s ostrou vstupní hranou. Zabudovává se do potrubí kolmo na jeho osu tak, aby byla osa kruhového otvoru clony souběžná s osou potrubí. Dodávají se pro všechny obvyklé světlosti potrubí až po potrubí o světlostech 1000 mm. [1]



Obr. 10 Normalizovaná clona [3]

Výhody:

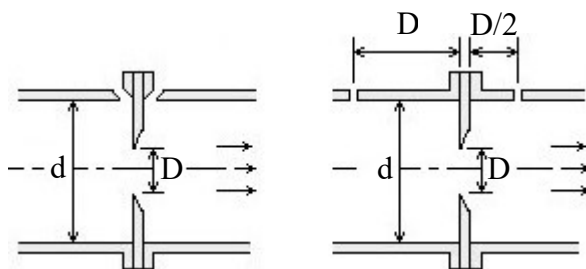
- nízké pořizovací náklady
- snadná výroba
- jednoduchá instalace
- neobsahuje pohyblivé části
- možnost měření průtoku v obou směrech

Nevýhody:

- velká tlaková ztráta
- opotřebení vnitřních okrajů otvoru clony
- nutný zásah do potrubí a odstávka

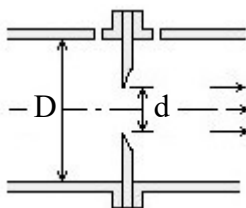
Pro měření průtoku na průměrech potrubí o velikosti 1000 mm jsou určeny normalizované clony: [3]

- s koutovým odběrem nebo s odběry ve vzdálenostech D a $D/2$



Obr. 11 Clona s kout. odběrem (vlevo) a clona s odběry ve vzdálenostech D a $D/2$ (vpravo) odběrem [17]

- s přírubovým odběrem



Obr. 12 Clona s přírubovým odběrem [17]

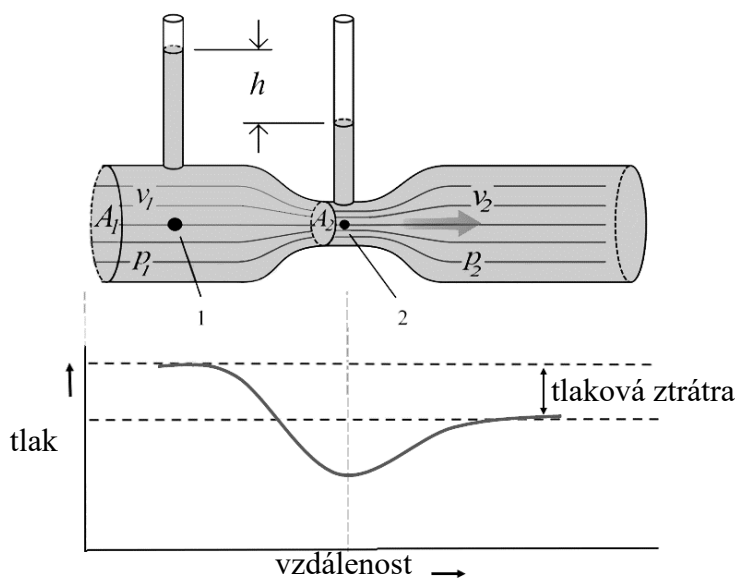
Mezi hlavní faktory, které ovlivňují kvalitu instalace clony je stav potrubí, poloha tlakových odvodů, dostatečná délka přímých úseků před a za clonou, sousost otvorů a osy potrubí, vhodné provedení a instalace přívodního potrubí tlaku. Nepříznivé důsledky může mít otupení hran clony erozí nebo korozí, deformace clony vlivem kavitace nebo usazeniny maziv. Jakákoliv z výše uvedených faktorů může mít za následek změnu hodnoty průtokového součinitele C až o 10%. Kombinované účinky výše uvedených faktorů jsou špatně předvídatelné. Celková nejistota se proto za běžných pracovních podmínek vyskytuje v rozsahu 2 až 5% z naměřených údajů.

Při měření průtoku na clonách musí být tlakové přívody umístěny zásadně dole, aby bylo impulzní potrubí stále zaplněno. Před připojením k samotnému tlakoměru musí být přívody tlaku odvzdušněny, jinak by mohlo docházet k posouvání nuly tlakoměru. Přívody ke snímači tlakové difference mají mít stejný průměr a musí být co nejkratší. Na odběrech tlaku je nutná instalace uzavíracích ventilů.

Pro rovnoměrné rozložení profilu samotného průtoku je vyžadováno použití uklidňujícího přímého úseku potrubí jak před, tak i za clonou. Délka přímého úseku potrubí před clonou závisí na poměru β , na druhu příruby a instalaci. Obecně se doporučuje deseti až patnácti násobek průměru potrubí D , délka přímého úseku potrubí nacházejícím se za přírubou má mít délku orientačně 5D až 10D. Pro zkrácení potřebných úseků délek přímého potrubí lze použít svazek asi deseti trubek o malých průměrech, vložených vedle sebe do potrubí před clonu. Tímto je možné zkrátit potřebnou délku náběhového úseku až o polovinu. [4]

3.1.2 Venturiho trubice

Tento typ průtokoměru se skládá ze vstupního válce, konfuzoru (postupné zúžení průměru), válcovitého hrdla a difuzoru (postupné rozšíření průměru). Difuzor umožňuje opětovné zvýšení tlaku v porovnání se clonou. Proto se Venturiho trubice používá tam, kde se vyžaduje malá tlaková ztráta. Tlaková ztráta Venturiho trubici zřídka přesáhne 10% měřené tlakové difference. Profil a samočistící vlastnosti Venturiho trubice zvyšují její odolnost proti usazeninám, korozi a erozi. Vyšší pořizovací náklady jsou tudíž kompenzovány sníženými nároky na údržbu. [3], [4], [5]



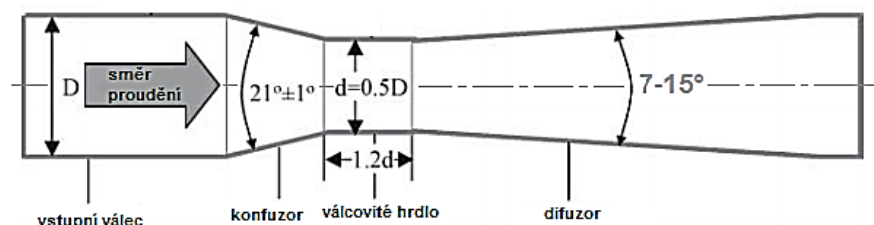
Obr. 13 Tlaková ztráta Venturiho trubice [28]

Pro měření průtoku na průměrech potrubí až do 1200 mm jsou vhodné klasické Venturiho trubice s plechovým svařovaným konfuzorem. Jedná se o klasickou Venturiho trubici, běžně vyráběnou svařováním. [3]



Obr. 14 Venturiho trubice s odběry tlaku v praxi [30]

Venturiho trubice se používá tam, kde se vyžaduje malá tlaková ztráta primárního prvku při daném rozsahu převodníku diferenčního tlaku. Malé tlakové ztráty je dosaženo tím, že za válcovité hrdlo trubice je zařazen kuželovitě se rozšiřující difuzor. Vrcholový úhel difuzoru se může dle normy volit v rozmezí 7° až 15° . V difuzoru dochází k postupnému zpomalení rychlosti proudění a zvyšuje se statický tlak tekutiny, díky tomu nedochází k tak velkým tlakovým ztrátám vířením, jako u clon. Úhel vstupní části Venturiho trubice (konfuzoru) je dán normou a má mít velikost 21° . Vzhledem k náročnější výrobě má Venturiho trubice vyšší pořizovací náklady v porovnání se clonou pro stejný průměr potrubí. [1], [5]. Jako příklad lze uvést cenu Venturiho trubice (s přírubami) pro potrubí DN 1000, orientační cena se pohybuje ve výši 400 000 Kč. Clona pro potrubí potrubí o stejném průměru se pohybuje ve výši 120 000 Kč. Údaje o cenách byly poskytnuty firmou MATTECH.



Obr. 15 Venturiho trubice [20]

Výhody:

- nižší tlaková ztráta oproti clonám
- neobsahuje pohyblivé části
- délka přímého úseku nutná pro měření je kratší než u clony

Nevýhody:

- vysoké pořizovací náklady
- velké rozměry

3.2 Indukční průtokoměry

Funkce elektromagnetických indukčních průtokoměrů je založena na principu Faradayova indukčního zákona, dle kterého se při pohybu elektrického vodiče v magnetickém poli indukuje napětí, jehož hodnota je dána vztahem: [2]

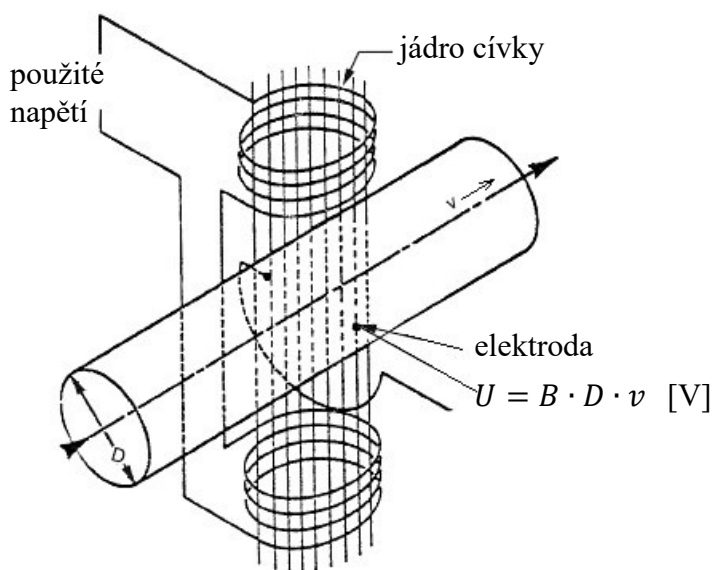
$$U = B \cdot D \cdot v \quad [\text{V}] \quad (8)$$

Pro potrubí kruhového průřezu o průměru D , kterým protéká kapalina, dostaneme úpravou:

$$U = B \cdot D \cdot \frac{Q}{S}$$
$$U = B \cdot D \cdot \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D} \quad [\text{V}] \quad (9)$$

kde:

B	magnetická indukce	[T]
D	vzdálenost mezi elektrodami	[m]
Q	průtok	[m ³ ·s ⁻¹]
U	napětí	[V]



Obr. 16 Schéma principu funkce indukčního průtokoměru [17]

Aby bylo indukované napětí co největší, je vhodné použít silného permanentního magnetu nebo elektromagnetu. Výhodné je použít střídavého magnetického pole a tím zabránit polarizaci měřeného média. Také zesílené střídavého indukovaného napětí je snadnější, než napětí stejnosměrné. [2]

Základní podmínkou pro použití indukčních průtokoměrů je elektrická vodivost měřeného média. Pro indukční průtokoměry je požadována elektrická vodivost lepší než $5 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$. Indukované napětí se snímá párem elektrod, které jsou v kontaktu s proudící látkou, nebo bezkontaktně kapacitním systémem. Aby se indukované napětí neodvedlo potrubím, musí být těleso snímače vyrobeno z elektricky nevodivého materiálu, anebo alespoň vnitřní povrch snímače musí být pokrytý izolační vrstvou. Pro zesílení se signál zpracovává tak, že frekvenci výstupních proudových impulsů odpovídá průtok – např. 1 impuls zodpovídá 1 m^3 . Používají se i jiné formy zpracování signálu – např. analogový výstup. [1]

Změny měrné hmotnosti, tlaku, teploty a viskozity neovlivňují měření. Měření není ovlivněno ani tvarem rychlostního profilu. Průtokoměry se vyznačují velmi malou až nevýznamnou tlakovou ztrátou a mohou měřit průtok v obou směrech. Snímače se vyrábějí pro vnitřní průměr potrubí od 10 do 3000 mm a maximální teplota měřené látky je 120°C . Nejistota měření se udává dle typu od 0,3 do 3 % z měřené hodnoty. [1]

Indukční průtokoměry se běžně používají pro měření průtoku vody, musí být však splněna podmínka minimální vodivosti. Dále se tyto průtokoměry využívají také v chemickém průmyslu. [1]

Průtokoměry jsou vyráběny pro světlosti potrubí od 3 do 3000 mm.

Výhody:

- vysoká přesnost měření
- při měření nevzniká žádná trvalá tlaková ztráta
- pro instalaci není potřeba zásah do potrubí
- nezávislost na hustotě, teplotě, viskozitě a dalších parametrech

Nevýhody

- vyšší pořizovací náklady
- nemožnost měření elektricky nevodivých kapalin



Obr. 17 Indukční průtokoměr v praxi [18]

3.3 Ultrazvukové průtokoměry

Princip ultrazvukových průtokoměrů spočívá ve změně rychlosti šíření, případně frekvence ultrazvukových vln, procházejících průtokem tekutiny. Ultrazvukové vlny jsou šířeny mezi vysílačem a přijímačem, které jsou rozmístěny na stěnách potrubí, ve kterém se měřená tekutina pohybuje. Proudící tekutina vyvolává změnu rychlosti ultrazvukových vln, která je úměrná rychlosti pohybu tekutiny. Ultrazvukové vlny jsou generovány i přijímány ultrazvukovým měničem, který pracuje střídavě jako vysílač a přijímač. Ultrazvukové průtokoměry se používají v potrubích o světlostech 13 až 3000 mm. [1]



Obr. 18 Indukční průtokoměr v praxi [19]

Výhody:

- nulová tlaková ztráta
- velký měřicí rozsah
- nepohyblivé části v konstrukci
- systém se prakticky neopotřebovává
- při instalaci není vyžadován zásah do potrubí, není nutná odstávka
- schopnost měřit několik veličin současně

Nevýhody:

- vyšší cena v porovnání s ostatními metodami

Oproti průřezovým průtokoměrům, nebo turbínovým zásuvným průtokoměrům, nemají ultrazvukové průtokoměry žádné pohyblivé části a pracují naprosto bezhlučně. Vyžadují pouze minimální údržbu. Instalace ultrazvukových průtokoměrů je jednoduchá, avšak je nutné přesně seřídit osy protilehlých měničů. Činnost ultrazvukového průtokoměru není ovlivňována vlastnostmi měřené tekutiny, zatímco bubliny nebo pevné částice v tekutině způsobují nevratná poškození na měřících částech mechanických průtokoměrů. Další výhodou je necitlivost ultrazvukových průtokoměrů vůči přítomnosti vnějšího magnetického pole. Průměry potrubí na které lze ultrazvukové průtokoměry aplikovat mohou být od 13 mm do 6 m, při průtocích 2 až 400 000 m³h⁻¹, teplotách – 300 až 600 °C a tlaku do 100 Mpa. Je možné měřit jak tekutiny ultračisté, tak i agresivní a s obsahem pevných částic. Rychlost šíření ultrazvukových vln je závislá na několika fyzikálních parametrech měřené tekutiny, díky čemuž je možné měřit současně i její další vlastnosti. [4]

Zásady správného provozu ultrazvukových průtokoměrů: [4]

- potrubí musí být zcela zaplněno měřenou kapalinou (kapalina pod tlakem)
- přítomnost vzduchu v kapalině ohrožuje činnost průtokoměru. Příčinou bývá netěsnící potrubí na sání čerpadel
- problémy nastávají při měření s částečně ohybnými potrubími (hadice), dochází k deformacím, které mění plochu průměru a přerušují akustickou vazbu s měničem
- instalace se doporučuje provádět v místech s minimálními vibracemi
- pro nejistoty řádu 2% je nutné použít uklidňovací délky potrubí 10 – 20D před a 5D za průtokoměrem.

- Není vhodné umisťovat řídicí ventily za průtokoměrem, může dojít k nepříznivému ovlivnění jeho činnosti, především při vysokých rychlostech nebo ke vzniku kavitací.

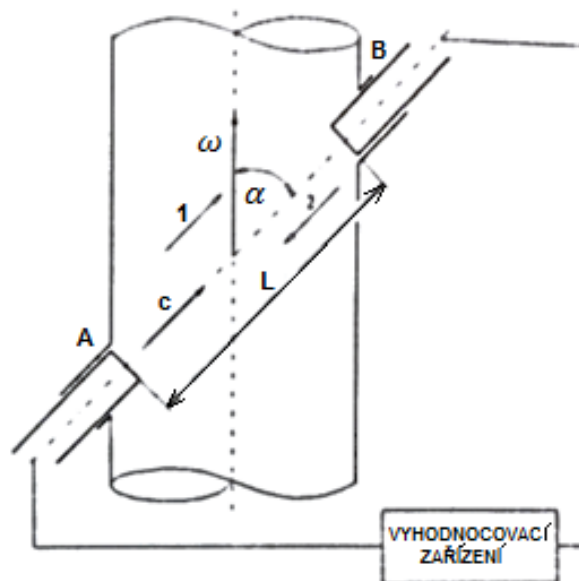
Ultrazvukové průtokoměry se dělí podle uspořádání na:

- přímé impulzní
- Dopplerovy

3.3.1 Přímé ultrazvukové průtokoměry

Jsou založeny na principu měření času průchodu impulzů ultrazvukových vln mezi vysílačem a přijímačem. Tyto průtokoměry jsou vhodné jak pro kapaliny, tak pro plyny. [2]

Princip přímého ultrazvukového průtokoměru si můžeme vysvětlit na následujícím schématu:



Obr. 19 Jedno z možných konstrukčních uspořádání průtokoměru [1]

Pod úhlem α jsou v protilehlých bodech potrubí umístěny vstupy, ve kterých jsou aktivní prvky průtokoměru A a B. Prvky A a B mění s definovanou frekvencí svoji úlohu. V časovém intervalu τ funguje prvek A jako přijímač a prvek B jako vysílač. Signál se šíří ve směru 1, přičemž dráhu L překoná za čas: [1], [2], [4]

$$\tau_1 = \frac{L}{c + \omega \cdot \cos \alpha} \quad [s] \quad (10)$$

$$\tau_2 = \frac{L}{c - \omega \cdot \cos \alpha} \quad [\text{s}] \quad (11)$$

frekvence signálů bude odpovídat:

$$\Delta t_2 - \Delta t_1 = 2L \cdot \frac{\omega \cdot \cos \alpha}{c^2 - \omega^2 \cos^2 \alpha} = 2L \cdot \frac{\omega \cdot \cos \alpha}{c^2} \quad [\text{s}] \quad (12)$$

kde:

c rychlost šíření ultrazvuku v neproudící tekutině $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
 α úhel natočení přijímače/vysílače od osy potrubí $[\text{°}]$
L vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem $[\text{m}]$
 $\Delta t_1 / \Delta t_2$ doba průchodu vlnění $[\text{s}]$

pro střední rychlost ω přibližně platí

$$\omega = \frac{c^2}{2L \cdot \cos \alpha} (\Delta t_2 - \Delta t_1) \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (13)$$

$$\omega_s = \frac{\omega}{k} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (14)$$

kde:

k korekční součinitel závislý na Re $[-]$

$k = 1,34$ pro $\text{Re}_D < 10^3$

$k = 1,1$ pro $\text{Re}_D = 10^3$ až $5 \cdot 10^3$

$k = 1 + \frac{0,295}{1,2 \ln \text{Re}_D - 1}$ pro $\text{Re}_D > 10^3$

nyní již můžeme vypočítat velikost objemového průtoku:

$$Q_v = S \cdot \omega \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (15)$$

Dále pak i frekvenci:

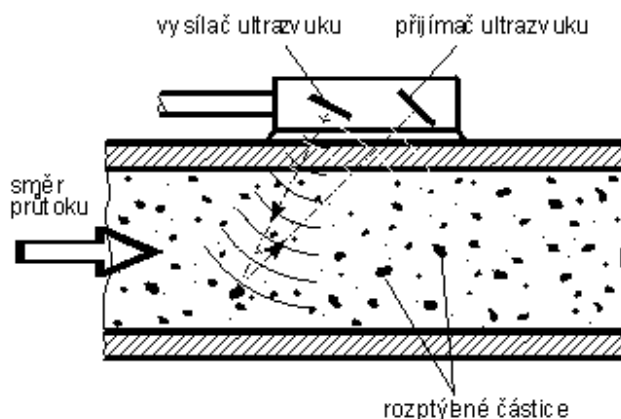
$$f_1 = \frac{1}{\tau_1} \text{ resp. } f_2 = \frac{1}{\tau_2} \quad [\text{Hz}] \quad (16)$$

kde:

τ_1, τ_2 doba průchodu $[\text{s}]$

3.3.2 Ultrazvukové průtokoměry s využitím Dopplerova principu

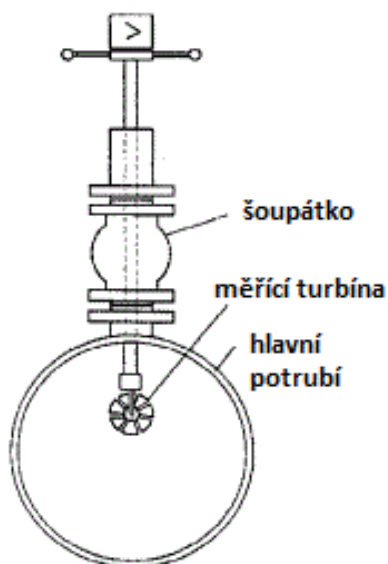
Tyto průtokoměry se používají pro měření průtoku v kapalinách, které obsahují nehomogenity, mezi které patří jemné pevné částice, prach, bubliny apod. Nehomogenity fungují jako miniaturní reflektory, které odrážejí ultrazvukové vlnění a vyvolávají frekvenční posun. Průtokoměry založené na Dopplerově principu měří v podstatě rychlost pohybu těchto nehomogenit. Při praktické realizaci jeden měnič neustále vysílá ultrazvukové vlny, které jsou pak po odrazu od nehomogenit přijímány přijímacím měničem, který bývá zpravidla umístěn na protilehlé straně potrubí. Z pohledu instalace je však výhodnější použití pouze jednoho měniče, který je přiložen (nebo trvale nainstalován) na stěnu potrubí. Tento měnič pak pracuje v režimu vysílač – přijímač. [1], [2], [4]



Obr. 20 Princip Dopplerova efektu [4]

3.4 Zásuvné turbínové průtokoměry

Zásuvné turbínové průtokoměry se používají pro měření průtoku v potrubích o velké světlosti (od DN 150 do DN 2000). Měří se především průtoky technologických a chladicích vod. Měřicí turbína se umísťuje do místa střední průřezové rychlosti proudění. V potrubích o světlostech menších než DN 320 se umísťuje také do osy potrubí. Před a za průtokoměrem se nachází přímé úseky potrubí od 10D (pro přímé potrubí) až po 40D pro dva 90° ohyby ve dvou rovinách. Délka uklidňovacího úseku pro přímé potrubí je za turbínou vždy 3D. Přímé úseky potrubí musí zaručit symetrický rychlostní profil a odstranit „zkrut“ proudění, který se může vyskytnout např. za dvěma ohyby potrubí v různých rovinách. [4]



Obr. 21 Zásuvný turbínový průtokoměr [4]

Jedním z problémů je u zásuvných turbínových průtokoměrů opotřebení ložisek. Ložiska je nutné v pravidelných intervalech měnit. Interval výměny je závislý na druhu média a na režimu provozu, většinou se však interval výměny pohybuje od osmnácti měsíců do pěti let. Výměna ložisek je však díky jednoduché instalaci průtokoměru v potrubí snadná a rychlá. Průtokoměr může být vyjmut bez nutnosti přerušení průtoku, opraven v rámci jedné hodiny a vložen zpět do původní pozice. V potrubích o velkých průměrech způsobuje malá turbína jen zanedbatelnou tlakovou ztrátu. [4], [12]

Výhody:

- několikanásobně nižší cena v porovnání s průtokoměry indukčními nebo ultrazvukovými
- zanedbatelná tlaková ztráta při měření v potrubích velkých průměrů
- možnost měření průtoku v obou směrech
- jednoduchá a levná instalace

Nevýhody:

- průtokoměr obsahuje pohyblivé části
- nutnost pravidelné kontroly ložisek

4 Porovnání vlastností uvedených způsobů měření průtoků

V následující tabulce jsem srovnal výhody a nevýhody vlastností uvedených způsobů měření průtoků.

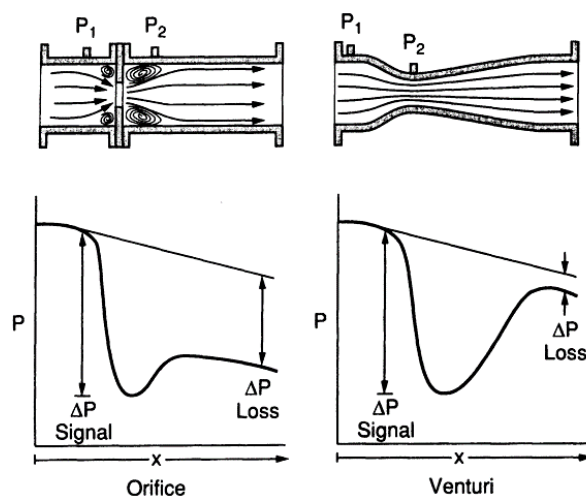
Průtokoměr	Výhody	Nevýhody
Clona	nízká cena	tlaková ztráta vyšší než u VT
	snadná výroba	možný vznik kavitace
	jednoduchá instalace	nutný zásah do potrubí pro instalaci
	žádné pohyblivé části	
	měření průtoku v obou směrech	
Venturiho trubice	nižší tlaková ztráta oproti clonám	pořizovací vysoké náklady
	žádné pohyblivé části	velké rozměry
	potřeba délky nižšího úseku nižší než u clony	
Indukční	vysoká přesnost měření	vysoké pořizovací náklady
	žádná tlaková ztráta	neměří elektricky nevodivé kapaliny
	pro instalaci není potřeba zásah do potrubí	
	nezávislost na hustotě, teplotě, viskozitě a dalších parametrech	
Ultrazvukový	žádná tlaková ztráta	vysoké pořizovací náklady
	velký měřicí rozsah	
	žádné pohyblivé části v konstrukci	
	praktický žádné opotřebení	
	pro instalaci není potřeba zásah do potrubí	
	schopnost měřit několik veličin najednou	
Zásuvný turbínový	jednoduchá instalace	konstrukce obsahuje pohyblivé části
	měření průtoku v obou směrech	
	zanedbatelná tlaková ztráta při měření v potrubích velkých průměrů	nutnost pravidelné kontroly a výměny ložisek
	nižší cena v porovnání s ostatními metodami	

Tabulka 1 – Porovnání výhod a nevýhod průtokoměrů

Porovnáme-li parametry uvedených metod měření průtoků, dojdeme ke zjištění, že ultrazvukové a indukční průtokoměry mohou být považovány za ty nejkvalitnější. Vysoké počáteční náklady těchto průtokoměrů jsou v porovnání s ostatními později kompenzovány téměř bezúdržbovým provozem a vysokou spolehlivostí.

Rozhodujeme-li se mezi clonou a Venturiho trubicí, je nutné zvážit velikost přípustné tlakové ztráty (viz obr. 23) a také rozměry. Výše pořizovacích nákladů Venturiho trubice pro stejný průměr potrubí je oproti cloně několikanásobně vyšší (viz. kapitola 3.1.2), tyto náklady jsou však kompenzovány nižší pravděpodobností vzniku kavitace, nižší tlakovou ztrátou, vyšší přesností měření a dalšími vlastnostmi uvedenými v kapitole 3.1.2.

V případě zásuvných turbínových průtokoměrů vítězí jejich nízká cena, jednoduchá instalace a možnost rychlé výměny při nutnosti kontroly. Další vlastnosti jsou uvedeny v kapitole 3.4.



Obr. 22 Porovnání tlakových ztrát clonou a Venturiho trubicí [7]

4.1 Porovnání rozsahů průměrů potrubí pro uvedené metody

V následující tabulce jsem uvedl rozsahy průměrů potrubí k uvedeným metodám měření průtoku. Jedná se o standartní, běžné rozsahy. V případě potřeby je však možné vyrobit průtokoměry i pro větší průměry potrubí.

Typ průtokoměru	Rozsahy průměrů
Clony ¹	$50 \text{ mm} \leq D \leq 1000 \text{ mm}$
Venturiho trubice ²	$200 \text{ mm} \leq D \leq 1200 \text{ mm}$
Ultrazvukový	$13 \text{ mm} \leq D \leq 6000 \text{ mm}$
Indukční	$3 \text{ mm} \leq D \leq 3000 \text{ mm}$
Zásuvný turbínový	$150 \text{ mm} \leq D \leq 2000 \text{ mm}$

1 - platí pro normalizované clony s koutovými nebo přírubovými odběry

2 - platí pro Venturiho trubici s plechovým svařovaným konfuzorem

Tabulka 2 – Rozsahy průměrů potrubí pro uvedené metody

Porovnání běžných hodnot přesnosti a rozsahů měření (poměr maximální a minimální měřitelné hodnoty průtokoměru) uvedených typů průtokoměrů:

Průtokoměr	Rozsah	přesnost
Clona	3 - 10:1	0,6 - 2 % z rozsahu
Veturiho trubice	4 - 10:1	0,6 - 2 % z rozsahu
Zásuvný turbínový	25:1	0,1 - 2 % z údaje
Ultrazvukový (klasický)	> 20:1	0,5 % z údaje - 2 % z rozsahu
Ultrazvukový (Doppler)	> 20:2	1 % z údaje - 2 % z rozsahu
Indukční	> 100:1	0,2 - 1 % z údaje

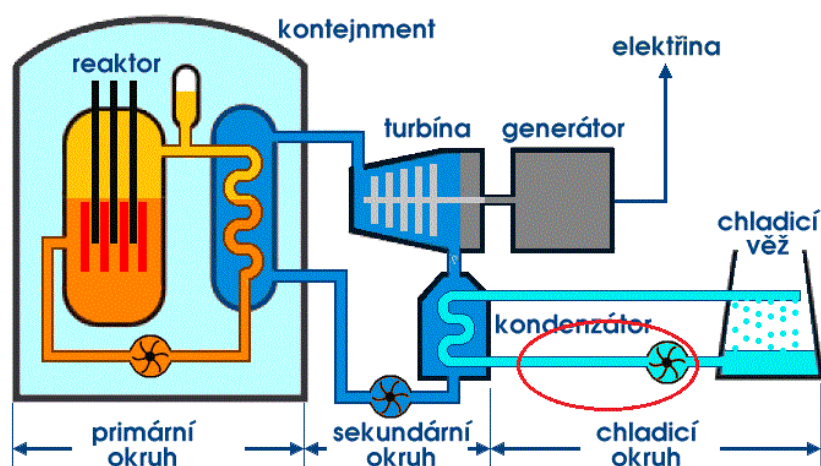
Tabulka 3 – porovnání běžných hodnot přesnosti a rozsahů měření

5 Návrh měření průtoku vody v potrubí o průměru 1000 mm

V této kapitole se budu věnovat vlastnímu návrhu měření průtoku vody v potrubí o průměru 1000 mm.

5.1 Výběr lokality

Jako místo pro návrh měření průtoku jsem zvolil přívodní potrubí chladicí vody cirkulačního okruhu mezi kondenzátorem a chladicí věží jaderné elektrárny. Velikost průtoku se v tomto místě často měří a používají se zde průměry potrubí o velikostech kolem 1000 mm, ale i více.



Obr. 23 Obecné schéma jaderné elektrárny [29]

5.2 Vstupní hodnoty a data primárního prvku

Jedná se standardní parametry, které se mohou nebo se běžně vyskytují v cirkulačních okruzích jaderných elektráren.

Médium: voda

Průměr potrubí: 1000 mm

Statický tlak: 300 kPa

Teplota vody: 20 °C

Hustota vody při 20 °C: 998 kg·m⁻³

Objemový průtok: 10000 m³·h⁻¹

Minimální požadovaný tlak za primárním prvkem: 100 kPa

Dynamický tlak:

$$p_2 = p_1 - \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) \quad (17)$$

$$p_2 = 300000 - \frac{1}{2} 998 (9,82^2 - 3,53^2)$$

$$p_2 = 258100 \text{ Pa}$$

Diferenční tlak:

$$\Delta p = (p_1 - p_2) \quad (18)$$

$$\Delta p = (300000 - 258100)$$

$$\Delta p = 41900 \text{ Pa}$$

Rychlost v průřezu primárního prvku:

$$Q = S_2 \cdot v_2 \quad (19)$$

$$v_2 = \frac{\left(\frac{10000}{3600}\right)}{\frac{\pi \cdot 0,6^2}{4}} = 3,82 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost v průřezu za primárním prvkem

$$Q = S_1 \cdot v_1 \quad (20)$$

$$v_1 = \frac{\left(\frac{10000}{3600}\right)}{\frac{\pi \cdot 1^2}{4}} = 3,54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

5.3 Výběr průtokoměru

Pro měření průtoku jsem se rozhodoval mezi clonou a Venturiho trubicí. Vzhledem k tomu, že Venturiho trubice má oproti cloně nižší tlakovou ztrátu, umožňuje měřit průtok s větší přesností, potřebná minimální délka přímého úseku je kratší a z dlouhodobého hlediska čelí oproti cloně nižšímu opotřebení, rozhodl jsem se pro Venturiho trubicí.

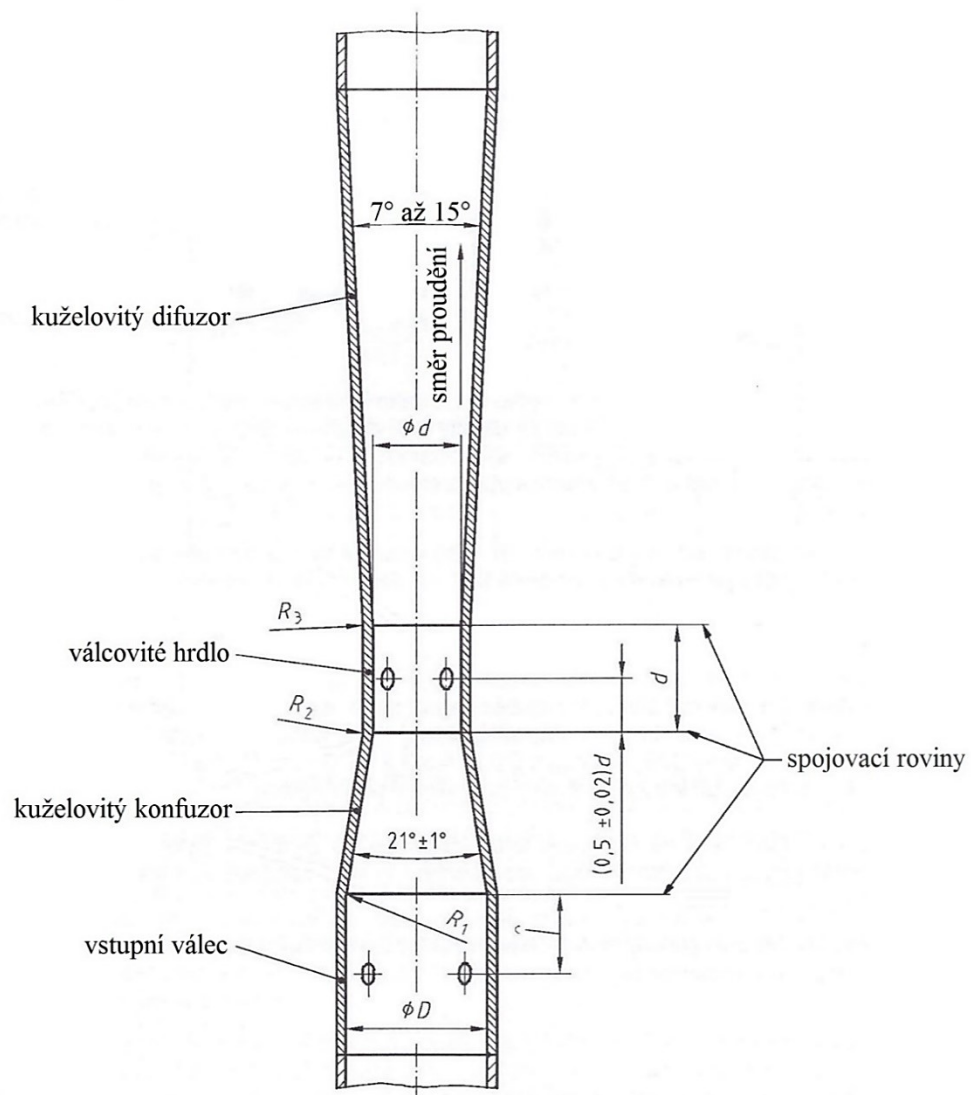
5.4 Návrh Venturiho trubice

V kapitole se budu věnovat vlastnímu návrhu Venturiho trubice, který je v souladu s normou ČSN EN ISO 5167 – 4. Určité věci však v normě uvedeny nejsou a je potřeba vlastního uvážení.

5.4.1 Typ Venturiho trubice

Volím klasickou Venturiho trubici s plechovým svařovaným konfuzorem. Jedná se o klasickou Venturiho Trubici běžně vyráběnou svařováním. Tyto klasické Venturiho trubice mohou být použity v potrubích o průměru mezi 200 až 1200 mm, čímž vyhovují mému zadání.

5.4.2 Rozměry Venturiho trubice



Obr. 24 Venturiho Trubice – popis částí a rozměry [3]

Poměr průměrů β musí být mezi 0,4 a 0,7 včetně.

$$\mathbf{D = 1000 \text{ mm}}$$

$$\text{Volím průměr } \mathbf{d = 600 \text{ mm}}$$

$$\beta = \frac{d}{D} = \frac{600}{1000} = \mathbf{0,6} \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Minimální délka válce měřená od roviny průniku komolého kužele B s válcem A smí být v důsledku výroby různá. Doporučuje se však, aby se volila rovna D.

Volím délku vstupního válce rovnu **D = 1000 mm**.

Úhel konfuzoru je dán normou a musí být 21°. Volím tedy úhel konfuzoru **21°**

Délku hrdla s průměrem d volím dle nařízení normy rovnu **$d = 600 \text{ mm}$** .

Kuželovitý vrchol difuzoru ϕ smí mít vrcholový úhel mezi 7° a 15°. Doporučuje se však volit úhel mezi 7° a 8°.

Vrcholový úhel kuželovitého difuzoru volím **$\phi = 8^\circ$** .

5.4.3 Odběry tlaků

Před klasickou Venturiho trubicí a v hrdle požaduje norma zvolit nejméně 4 odběry. Pro dosažení větší přesnosti měření volím počet odběrů tlaků **6**. Propojení odběrů tlaku bude realizováno prstencovými komorami. Protože je d větší než 33,3 mm, musí být průměr odběrů tlaku mezi 4 mm a 10 mm a nesmí být větší než 0,1D u předních odběrů tlaku a 0,13d u odběrů tlaků v hrdle.

Průměr předních odběrů tlaku volím **6 mm** a průměr odběrů tlaku v hrdle volím **6 mm**.

Vzdálenost osy předních odběrů tlaku od roviny průniku vstupního válce s konfuzorem má být rovna 0,5D.

Volím tedy tuto vzdálenost $0,5 \cdot 1000 = \mathbf{500 \text{ mm}}$.

Vzdálenost osy odběrů tlaků v hrdle od roviny průniku s konfuzorem musí být rovna 0,5d.

Volím tedy tuto vzdálenost $0,5 \cdot 500 = \mathbf{250 \text{ mm}}$.

5.4.4 Požadavky na zabudování Venturiho trubice

Pro poměr průměrů $\beta = 0,6$ jsou požadované minimální délky v násobcích D mezi různými druhy tvarovek, které jsou umístěny před klasickou Venturiho trubicí následovně:

	poměr průměrů $\beta = 0,6$	jednoduché koleno 90°	dvě nebo více kolen 90° v téže rovině nebo v různých rovinách	zúžení potrubí z 1,33D na D v délce 2,3D	rozšíření potrubí z 0,67D na D v délce 2,5D	zúžení potrubí z 3D na D v délce 3,5D	rozšíření potrubí z 0,75D na D v délce D	zcela otevřený kulový kohout nebo zcela otevřený šoupě
A		10	10	4	6	8,5	3,5	4,5
B		3	3	d	4	2,5	2,5	2,5

Sloupec A pro každou tvarovku udává délky odpovídající hodnotě nulové přídavné nejistoty.
Sloupec B pro každou tvarovku udává délky odpovídající hodnotám 0,5 % přídavné nejistoty.

Tabulka 4 - Požadované délky přímých úseků pro klasické Venturiho trubice

Pokud se jedná o přímé délky potrubí za Venturiho trubici, tvarovky a jiné poruchy proudění umístěné nejméně čtyři průměry hrdla za rovinou odběrů tlaku v hrdle neovlivní přesnost měření. [3]

Předpokládám splnění požadavků z tabulky 4 na zabudování a dodržení minimálních délek před a za Venturiho trubici.

5.5 Návrh provedení měření průtoku

Pro realizaci měření průtoku je nutné navrhnout vhodný způsob připojení snímače tlakové difference. Potrubí, které přivádí tlakový signál z Venturiho trubice do vstupu sekundárního zařízení se nazývá tlakové potrubí nebo také impulzní potrubí. Ventily, umístěné v tlakovém potrubí za primárním prvkem se nazývají oddělovací ventily. Potrubí, navzájem spojující dvě větve tlakového potrubí, které přivádí signál tlakové difference ke snímači tlakové difference se nazývá přepouštěcí potrubí. Uzavírací ventil v přepouštěcím potrubí se nazývá přepouštěcí ventil. Přepouštěcí potrubí a ventil se mohou spolu s dalšími, výše uvedenými ventily nahradit takzvanou ventilovou soupravou. V mém případě použiji způsob připojení snímače, který je znázorněn na obrázku č. 27, kdy jsem se rozhodl použít pěticestnou ventilovou soupravu. Bližší specifikace ventilové soupravy je uvedena v kapitole 5.8.3.

5.6 Vliv změny parametrů měřené kapaliny na přesnost měření

Při měření průtoku průřezovými průtokoměry je kromě tlakového rozdílu Δp nutné také sledovat změny hustoty měřeného média. U kapalin (v mém případě vody) platí, že hustota je funkcí teploty. Korekční součinitel pro objemové měření průtoku kapalin lze zapsat ve tvaru: [2]

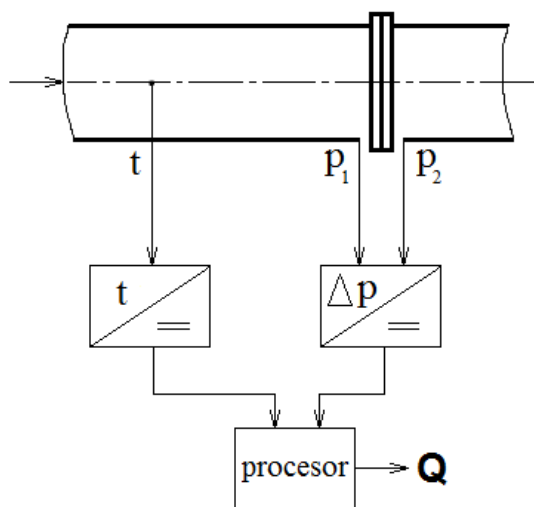
$$k_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \vartheta \cdot t_1}} \quad [-] \quad (21)$$

kde:

ϑ teplotní součinitel objemové roztažnosti $[K^{-1}]$
 t_1 teplota měřené kapaliny $[^{\circ}C]$

Na obrázku 25 je vyobrazeno schéma pro automatickou korekci objemového měření průtoku kapalin. Toto schéma je také základem pro návrh mého měření průtoku. Během

automatické korekce je snímána zároveň teplota kapaliny t_1 a současně se signálem tlakové difference se zpracovává pomocí vyhodnocovacího zařízení. Na displeji je pak možné číst přímo korigovaný údaj.



Obr. 25 Automatická korekce měření průtoku kapaliny [2]

5.7 Návrh impulzního potrubí

Rychlost odezvy snímaného tlaku na škrťacím orgánu se zmenšuje s rostoucí délkou impulzního potrubí. Délka impulzního potrubí nesmí přesáhnout 45 m. V mém případě předpokládám, že délka impulzního potrubí nepřekročí 16 m a typem měřené tekutiny bude voda o teplotě 20 °C. Dle normy ISO 2186 pro tyto parametry platí doporučený průměr trubek 7 – 9 mm. Volím průměr trubek **9 mm**.

5.8 Návrh měřících přístrojů a jejich příslušenství

Pro údaje o tlakové diferenci, teplotě média a pro určení výsledného průtoku je nezbytné zvolit náležitá měřicí zařízení a k nim také potřebné příslušenství. V této kapitole se budu věnovat návrhu vhodného snímače teploty, snímače diferenčního tlaku, vyhodnocovacího zařízení a příslušenství k uvedeným přístrojům.

5.8.1 Snímač teploty

Mezi snímače, které jsou vhodné pro měření teploty kapaliny v potrubí a které převádí teplotu na elektrické veličiny se řadí kovové odporové snímače teploty. Za nejlépe

Pro měření teploty vody ve Venturiho trubici jsem zvolil jímkový odporový snímač teploty s převodníkem a displejem s označením 231 od firmy ZPA Nová Paka a.s. Tento snímač teploty používá teplotní čidlo typu pt100, což znamená, že materiál odporového drátku je platina a velikost odporu při teplotě 0 °C je rovna 100 Ω. [13]

- 1 hlavice kulová (slitina Al)
(pro převodník Ex ia s vnější a vnitřní svorkou)
 - 2 hlavice kulová se zvýšeným víkem (slitina Al)
bez displeje pro převodník ve víku nebo s displejem
(pro převodník Ex ia s vnější a vnitřní svorkou)
 - 3 kabelová vývodka M20x1,5
- L jmenovitá délka
Ln délka nástavku
Lmv délka měřicí vložky
11* standardní délka zašroubování

Tento snímač se používá pro přesné dálkové měření teploty proudících i klidných tekutin (kapalin i plynů). Zvolené provedení s převodníkem převádí signál odporového čidla na unifikovaný výstupní signál o velikosti 4 – 20 mA. Výstupní signál z měřicího senzoru je

hodnota odporu, která je lineárně úměrná teplotě. Provedení s displejem také umožňuje okamžité zobrazení hodnoty měřené veličiny. Zvolený snímač teploty s převodníkem bude propojen s vyhodnocovacím zařízením (procesorem) INMAT 66 dle obrázku 25.

Vzdálenost jímky pro snímač teploty volím dle normy ČSN EN ISO 5167 rovnu:

$$4D = 4 \cdot 1000 = 4000 \text{ mm}$$

Technické parametry snímače teploty:

teplotní čidlo: pt100

výstupní signál: 4 – 20 mA

napájecí napětí: 24V DC

připojovací závit: M18 x 1,5

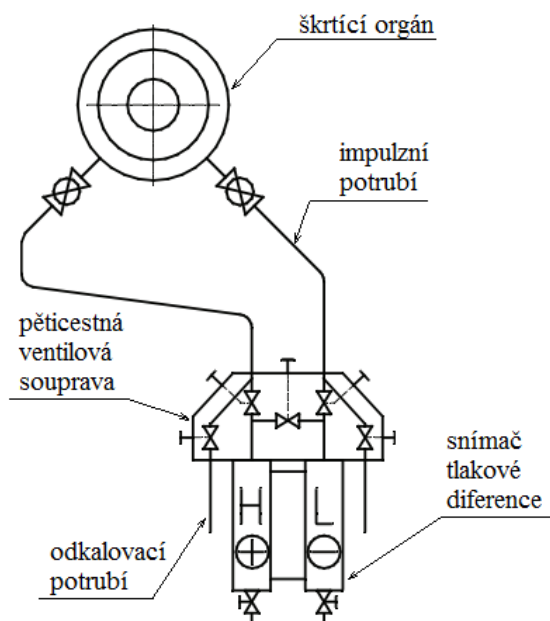
průměr odporové vložky: 6 mm

rozsah měřených teplot: -50 až +100 °C

Další technické parametry a veškeré podrobnosti daného snímače teploty jsou dostupné v katalogovém listu snímače od společnosti firmy ZPA Nová Paka a.s. [13]

5.8.2 Snímač tlakové difference

Pro měření diferenčního tlaku ve Venturiho trubici je potřeba instalovat snímač diferenčního tlaku. Při měření kapalin se doporučuje instalovat snímač pod škrticí orgán, aby mohly případné plyny v kapalině odcházet do provozního potrubí. Není-li možné umístit snímač diferenčního tlaku pod škrticí orgán z prostorových důvodů, může být umístěn i nad škrticím orgánem, ale toto umístění se nedoporučuje. V mém případě přepokládám, že měření průtoku bude realizováno v místě s dobrým přístupem a možností umístění snímače diferenčního tlaku pod Venturiho trubici. Aby se zabránilo pronikání nečistot do snímače z impulzního potrubí, odkaluje se samotný snímač diferenčního tlaku až po odkalení impulzního potrubí. Během uvádění potrubí do provozu a během odkalování impulzního potrubí je nutné zajistit uzavření připojovacích ventilů snímače. Odkalování snímače se provádí pomocí odkalovacích ventilků, které jsou součástí snímače.



Obr. 27 Schéma měření kapaliny pěticestnou ventilovou soupravou [9]

Z katalogu tlakových snímačů ZPA Nová Paka volím snímač tlakové difference difference s převodníkem s označením Rosemount 3051CD. [14]



Obr. 28 Snímač tlakové difference s převodníkem – Rosemount 3051C [14]

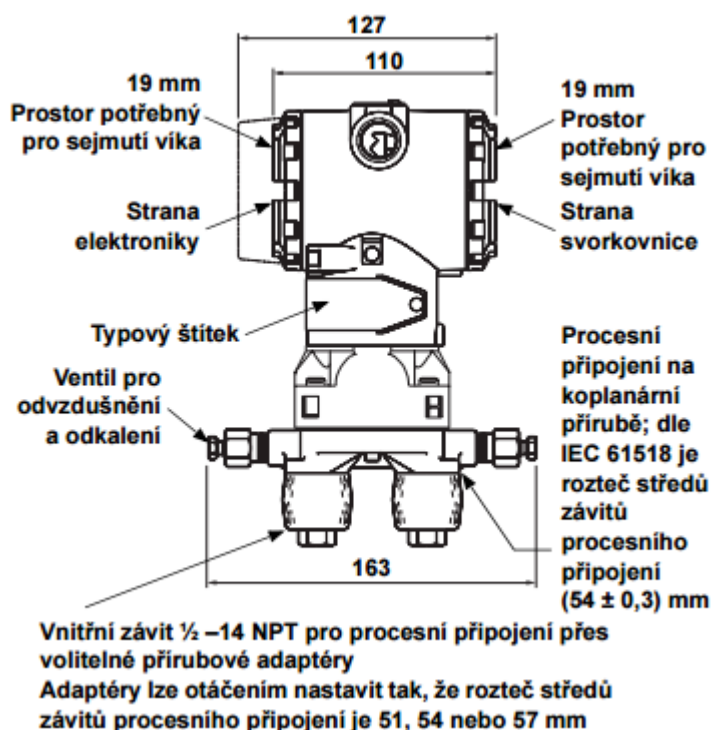
Jedná se o snímač tlakové difference pro různé aplikace v průmyslu. Může být oboustranně vystaven tlakům kapalin a plynů. Tlakový rozdíl se převádí na výstupní analogový signál o velikosti 4 – 20 mA. Provedení s koplanární přírubou umožňuje snadné připojení ventilové soupravy.

Rozsah	Minimální rozpětí	Horní mez rozsahu (URL)	Dolní mez rozsahu
	3051CD ⁽¹⁾ , CG, L, H		3051CD Diferenční
0	0,025 kPa	0,75 kPa	-0,75 kPa
1	0,124 kPa	6,23 kPa	-6,23 kPa
2	0,623 kPa	62 kPa	-62 kPa
3	2,490 kPa	249 kPa	-249 kPa
4	20,68 kPa	2 070 kPa	-2 070 kPa
5	138 kPa	13 790 kPa	-13 790 kPa

Obr. 29 Limitní hodnoty rozsahů [14]

Volím provedení s rozsahem 2, kdy je horní mez rozsahu diferenčního tlaku 62 kPa, přičemž diferenční tlak ve Venturiho trubici je v mém případě 41,9 kPa. Tím je navržený rozsah snímače tlakové difference vyhovující. Maximální dovolené jednostranné přetížení je 20 bar. Těmito rozsahy tlaků vyhovuje dané provedení mým parametrům.

Chybu nuly je možno odstranit kalibrací při statickém tlaku (viz. kapitola 5.9.3). Pro provedení 2 platí rozsah statického tlaku 0 – 13790 kPa, což je v mém případě ($p_{st} = 300$ kPa) naprosto dostačující.

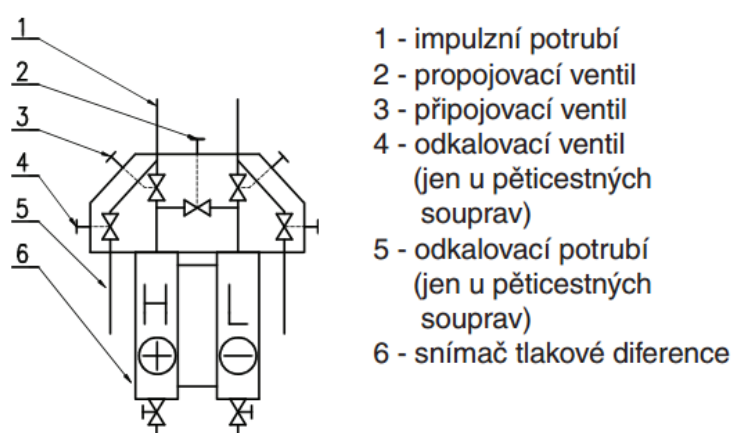


Obr. 30 Boční vyobrazení převodníku s koplanárním provedením příruby [14]

Další technické parametry a veškeré podrobnosti jsou dostupné v katalogovém listu snímače diferenčního tlaku Rosemount 3051 od výrobce ZPA Nová Paka, a.s. [14]

5.8.3 Pěticestná ventilová souprava

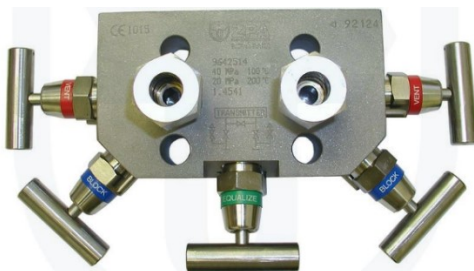
Důležitým doplňkem ke snímáči tlakové difference je ventilová souprava. Pro většinu snímačů tlakové difference se používá buď třícestná ventilová souprava nebo pěticestná ventilová souprava. Rozdíl mezi třícestnou a pěticestnou ventilovou soupravou je v tom, že pěticestná obsahuje navíc odkalovací (odvzdušňovací) ventily k odkalení (odvzdušnění) impulzního potrubí.



Obr. 31 Připojení pěticestné ventilové soupravy [9]

Během provozu je propojovací ventil uzavřen, zatímco připojovací ventily jsou otevřeny. Účelem zařízení je izolovat a vyrovnat tlak, který působí na snímač pro účely údržby, odpojení snímače diferenčního tlaku, propojit oba vstupní tlaky pro seřízení nuly snímače diferenčního tlaku.

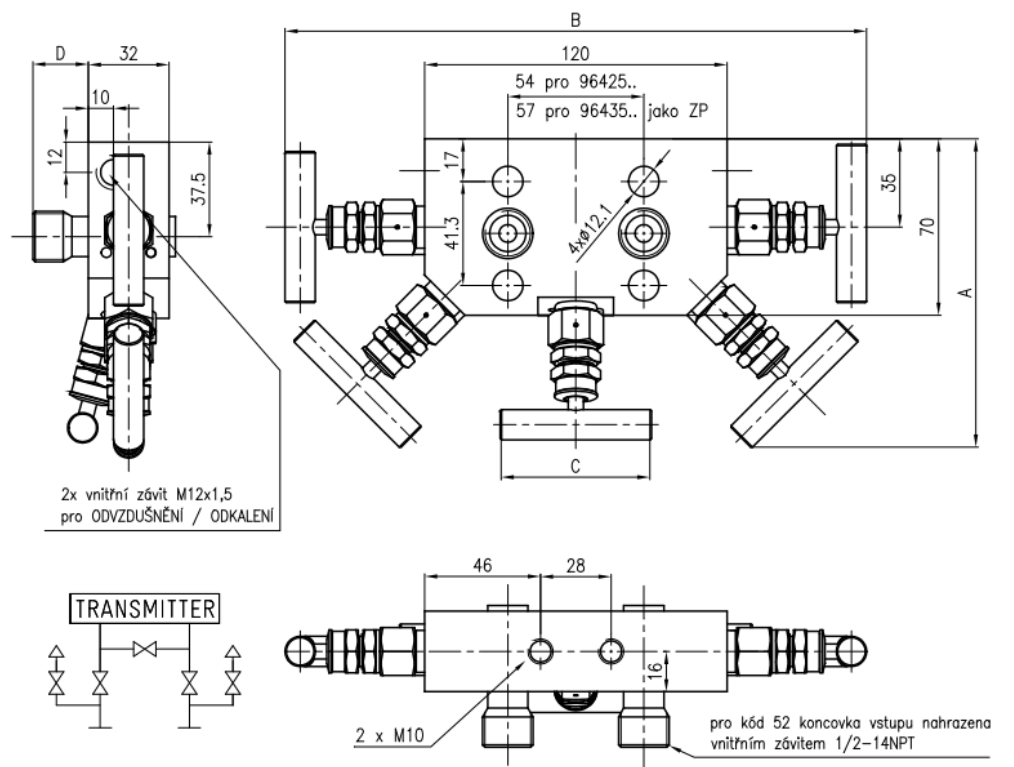
Pro svůj návrh měření jsem zvolil pěticestnou ventilovou soupravu na koplanární přírubu s označením 964 od společnosti ZPA Nová Paka, a.s. [15]



Obr. 32 Pěticestná ventilová souprava 964 [15]

Pro zavedení snímače diferenčního tlaku do provozu s pomocí pěticestné ventilové soupravy platí následující postup:

1. Zkontrolovat, zda je HP, LP, odkalovací a propojovací ventil uzavřen
2. Otevřít propojovací ventil. To zajistí, že na obě strany snímače tlakové difference bude působit stejný tlak (nulový diferenční tlak)
3. Pomalu otevřít HP ventil
4. Uzavřít propojovací ventil. To způsobí uzamčení stejného tlaku na obou stranách snímače tlakové difference
5. Otevřít LP ventil. Tím bude zajištěn přívod nízkého tlaku na nízkotlakou stranu snímače tlakové difference



Obr. 33 Pěticestná ventilová souprava na koplanární přírubě [15]

5.8.4 Vyhodnocovací zařízení

Vyhodnocovací zařízení (procesor) slouží pro převod výstupních signálů na přepočet veličin. Jako vyhodnocovací zařízení volím Měřič průtoku, tepla, stavový přepočítávač plynů INMAT 66. [16]



Obr. 34 Inmat 66 [16]

Výhodou zařízení je možnost měření a zpracování dalších veličin, možnost měření průtoku různých médií (technických kapalin, plynů, vodní páry) v jenom přístroji současně, přístroj je možno použít pro víceokruhové měření.

Výstupní signály:

- 1 x LCD display dvouřádkový, 16 znaků
- 4 x výstupní analogové signály 0 – 20 mA

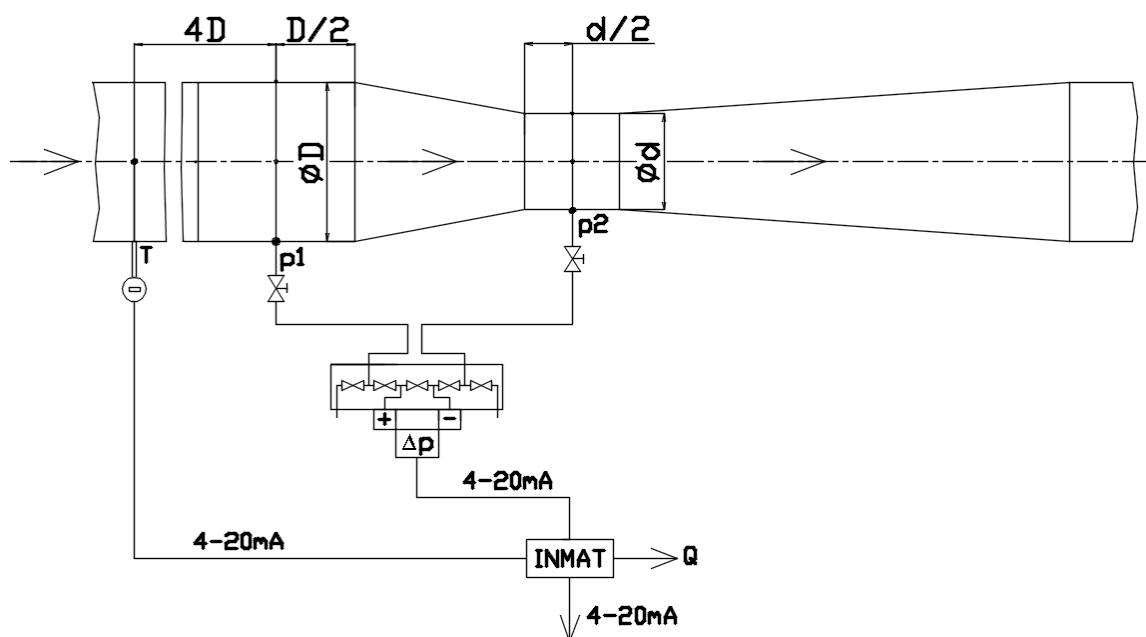
Teplota okolního prostředí:

-20 – 55 °C v provedení Industrial

Snímač teploty s převodníkem, a snímač diferenčního tlaku jsou propojeny s navrženým vyhodnocovacím zařízením INMAT 66 dle obrázku 26. Zařízení na základě vstupních parametrů a snímaných veličin (teplota, diferenční tlak) vypočte velikost průtoku, což je cílem návrhu měření.

Další technické parametry a veškeré podrobnosti jsou dostupné v katalogovém listu přístroje INMAT 66 od výrobce ZPA Nová Paka, a.s. [16]

5.9 Vlastní schéma návrhu měření průtoku



Obr. 35 Vlastní schéma návrhu měření

Schéma návrhu mého měření sestává z Venturiho trubice o vnitřním průměru 1000 mm, kterou proudí voda ve směru šipky dle obrázku 35. Z Venturiho trubice je snímán statický a dynamický tlak, který je impulzním potrubím veden do pěticestné ventilové soupravy, za kterou následuje snímač diferenčního tlaku. Ze snímače diferenčního tlaku je veden signál o velikosti 4 -40 mA do procesoru, kterým je v mém případě vyhodnocovací zařízení INMAT 66. Dále se pak pomocí pak pomocí teplotního snímače s převodníkem snímá teplota vody, výstupem je opět signál o velikosti 4 – 20 mA, vedoucí do vyhodnocovacího zařízení INMAT 66. Na základě zadaných vstupních parametrů a na základě údajů naměřených veličin pak vyhodnocovací zařízení INMAT 66 vypočte velikost průtoku a zobrazí jej na svém displeji, údaje jsou dále odvedeny do řídicí centrály.

5.10 Konstrukční výkres Venturiho trubice

Konstrukční výkres Venturiho trubice je přiložen jako příloha č. 1. Zhotovení je provedeno v souladu s příslušnými normami pro technické kreslení. Pro vyhotovení výkresu jsem použil studentskou verzi programu Autocad Mechanical.

6 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo zorientovat se v problematice měření průtoků vody v potrubích velkých průměrů, popsat a porovnat jednotlivé metody měření, uvést jejich výhody a nevýhody. Hlavním předmětem práce bylo provést vlastní návrh měření průtoku vody v potrubí o průměru 1000 mm.

V první části bakalářské práce jsem se zabýval základními pojmy z oblasti mechaniky tekutin, které jsou nezbytné pro pochopení principů, na kterých jsou založeny základní metody měření průtoků. Dále jsem popsal možnosti využití velkých průměrů potrubí energetice a principy těch druhů měření průtoků, které umožňují a běžně se používají v potrubích o průměru cca 1000 mm, ale i více. V závěru kapitoly jsem provedl souhrnné srovnání všech uvedených metod z různých hledisek.

Druhá část bakalářské práce se zabývá vlastním návrhem měření průtoku vody v potrubí o průměru 1000 mm. Jako pomyslný bod pro návrh jsem zvolil přírodní potrubí chladicího okruhu jaderné elektrárny, nacházející se mezi kondenzátorem a chladicí věží. Jako průtokoměr jsem zvolil Venturiho trubici. Kapitola se zabývá dimenzováním Venturiho trubice, volbou snímačů veličin spolu s příslušenstvím a veškerými náležitostmi, které s návrhem souvisí. Návrh měření jsem znázornil schématem a součástí praktické části je i konstrukční výkres Venturiho trubice.

Bakalářská práce by měla čtenáři umožnit ucelené porovnání jednotlivých metod měření a nahlédnutí do problematiky návrhu měření průtoku vody v potrubí o průměru 1000 mm.

7 Seznam použité literatury

- [1] Rajniak a kolektiv: Tepelno-energetické a emisné meranie. Ister Science, 1997. ISBN 80-01-01145-3.
- [2] Ambros, F.: Experimentální metody a technika. Praha ČVUT, 1993 ISBN 80-01-00972-6.
- [3] ČSN ISO 5167. Měření průtoků tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku. 1993
- [4] S Ďaďo, L. Bejček, A. Platil.: Měření průtoků a výšky hladiny. BEN - technická literatura, Praha 2005
- [5] Good practice guide, An introduction to differential-pressure flow meters [online]. National measurement system. Dostupné z:
http://www.tuvnel.com/x90lbn/An_Introduction_to_Differential-Pressure_Flow_Meters.pdf
- [6] Osobní sdělení, ČEZ, a.s., Jaderná Elektrárna Dukovany – Informační centrum [2017-03-21]. infocentrum.edu.cez@cez.cz
- [7] Robert Moffat: Mechanical Engineer's handbook [online]: Instrumentation, Systems, Controls, and MEMS, Volume 2, Third Edition, pp. 131-188. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/229574549_Temperature_and_Flow_Transducers
- [8] Sylva Drábková a kolektiv: Mechanika tekutin, učební text. [online] Ostrava 2007. Dostupné z:
<http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/MT/Mechanika%20tekutin.pdf>
- [9] Montáž a údržba měřicího okruhu průtoků a tepla [online]. JSP Měření a regulace. Dostupné z: <http://www.jsp.cz/files/f0089npcz.pdf>
- [10] kolektiv pracovníků VODNÍ DÍLA – TBD s.s. : Významná vodní díla – vyhodnocení funkce a bezpečnosti vodních děl za povodní – část I [online]. Dostupné z: http://voda.chmi.cz/pov13/DilciZprava_DU_3_1_cast1-VyznamnaVD-final.pdf

- [11] Mechanical Properties of Fluids, Chapter Ten, [online]. NCRT Solutions.
Dostupné z: <https://schools.aglasem.com/1402>
- [12] Les Bottoms: Fundamentals of Insertion Turbine Meters, [online]. American School of Gas Measurement Technology, Houston, Texas 2002. Dostupné z: <http://asgmt.com/wp-content/uploads/pdf-docs/2002/1/11.pdf>
- [13] Katalogový list 231 – Snímač odporový do jímky DIN bez převodníku nebo s převodníkem [online], ZPA Nová Paka a.s., Dostupné z: <http://www.zpanp.cz/files/doc/snimac-teploty-odporovy-do-jimky-din-bez-prevodniku-nebo-s-prevodnikem-29-9.pdf>
- [14] Katalogový list 3051 – Rosemount 3051 – Převodník tlaku, ZPA Nová Paka a.s., [online]. Dostupné z: <http://www.zpanp.cz/files/doc/prevodnik-tlaku-rosemount-3051-24-4.pdf>
- [15] Katalogový list 964 – Souprava ventilová, ZPA Nová Paka a.s., [online]. Dostupné z: <http://www.zpanp.cz/files/doc/souprava-ventilova-24-4.pdf>
- [16] Katalogový list 466 – Měřič průtoku, tepla, stavový přepočítávač plynů INMAT 66, ZPA Nová Paka a.s., [online]. Dostupné z: <http://www.zpanp.cz/files/doc/souprava-ventilova-24-4.pdf>
- [17] [online]. 2017 [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: <http://www.piping-engineering.com/flow-meter-measurement-techniques-types.html#>
- [18] [online]. 2010 [cit. 2017-01-06]. Dostupné z: <http://www.flowcontrolnetwork.com/flowmeter-piping-requirements/>
- [19] [online]. 2013 [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: <http://www.flowline.co.uk/news/metering-saves-money.html>
- [20] [online]. 2016 [cit. 2017-02-13]. Dostupné z: <https://www.911metallurgist.com/blog/venturi-cavitation-tube>

- [21] [online]. 2016 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z:
<http://www.elektrorevue.cz/clanky/01049/index.html>
- [22] [online]. 2017 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z:
<http://erenovable.com/energia-geotermica/>
- [23] [online]. 2015 [cit. 2017-03-15]. Dostupné z:
<http://oenergetice.cz/typy-elektren/precerpavaci-vodni-elektrarna-princip-usporadani-2/>
- [24] [online]. 2016 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z:
<http://oenergetice.cz/jaderne-elektrany/jaderna-elektrarna-temelin-technicky-skvost-z-jiznich-cech/>
- [25] [online]. 2011 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z:
<http://www.maintenancetechnology.com/2011/10/certification-matters-part-iv-fluid-power-basics/>
- [26] [online]. 2015 [cit. 2017-03-23]. Dostupné z:
http://energyeducation.ca/encyclopedia/Bernoulli%27s_equation
- [27] [online]. 2000 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z:
<http://propojenenadrze.wz.cz/theory/Theory.php?id=2>
- [28] [online]. 2017 [cit. 2017-03-29]. Dostupné z:
<http://www.mecholic.com/2016/11/venturi-meter-construction-working-equation-application-advantages.html>
- [29] [online]. 2016 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z:
<http://www.spssvsetin.cz/assets/06/elektrarna.htm>
- [30] [online]. 2017 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z:
<http://www.controlplusinc.com/products/venturi-flow-meters/>

8 Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma pro odvození principu Benroulliho rovnice	12
Obr. 2 Výtok z nádoby - odvození Torriceliho vzzorce	13
Obr. 3 Princip Pascalova zákona	14
Obr. 4 Rychlostní profily pro různé druhy proudění tekutiny	14
Obr. 5 Vliv změny průměru potrubí na tvar rychlostního profilu	15
Obr. 6 Schéma jaderné elektrárny Temelín	17
Obr. 7 Schéma přečerpávací vodní elektrárny Dlouhé stráně	18
Obr. 8 Schéma geotermální elektrárny	19
Obr. 9 Tlakový rozdíl na cloně	21
Obr. 10 Normalizovaná clona.....	22
Obr. 11 Clona s kout. odběrem (vlevo) a clona s odběry ve vzdálenostech D a $D/2$ (vpravo) odběrem	23
Obr. 12 Clona s přírubovým odběrem	23
Obr. 13 Tlaková ztráta Venturiho trubice.....	24
Obr. 14 Venturiho trubice s odběry tlaku v praxi.....	25
Obr. 15 Venturiho trubice.....	25
Obr. 16 Schéma principu funkce indukčního průtokoměru	26
Obr. 17 Indukční průtokoměr v praxi	28
Obr. 18 Indukční průtokoměr v praxi	28
Obr. 19 Jedno z možných konstrukčních uspořádání průtokoměru	30
Obr. 20 Princíp Dopplerova efektu.....	32

Obr. 21 Zásuvný turbínový průtokoměr	33
Obr. 22 Porovnání tlakových ztrát clonou a Venturiho trubicí	35
Obr. 23 Obecné schéma jaderné elektrárny	36
Obr. 24 Venturiho Trubice – popis částí a rozměry	39
Obr. 25 Automatická korekce měření průtoku kapaliny	42
Obr. 26 Odporový snímač teploty s převodníkem 231	43
Obr. 27 Schéma měření kapaliny pěticestnou ventilovou soupravou	45
Obr. 28 Snímač tlakové difference s převodníkem – Rosemount 3051C	45
Obr. 29 Limitní hodnoty rozsahů	46
Obr. 30 Boční vyobrazení převodníku s koplanárním provedením příruby	46
Obr. 31 Připojení pěticestné ventilové soupravy	47
Obr. 32 Pěticestná ventilová souprava 964	48
Obr. 33 Pěticestná ventilová souprava na koplanární přírubu	48
Obr. 34 Inmat 66	49
Obr. 35 Vlastní schéma návrhu měření	50

9 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Porovnání výhod a nevýhod průtokoměrů	34
Tabulka 2 – Rozsahy průměrů potrubí pro uvedené metody.....	35
Tabulka 3 – porovnání běžných hodnot přesnosti a rozsahů měření.....	36
Tabulka 4 – Požadované délky přímých úseků pro klasické Venturiho trubice	40

10 Seznam příloh

Příloha č. 1 – Konstrukční výkres Venturiho trubice	
---	--